

# Kapazitive Datenerfassung für einen Ammoniak-Sensor für biogene Reststoff-Feuerungen

*Thomas Wöhrl, Ralf Moos und Gunter Hagen*

Lehrstuhl für Funktionsmaterialien, Universität Bayreuth, Bayreuth, Deutschland  
Kontakt: funktionsmaterialien@uni-bayreuth.de

## Einleitung

Durch steigende Anforderungen bei der Überwachung und zur Erhöhung der Effizienz vieler technischer Anlagen sind Sensoren zur in-situ-Datenerfassung erforderlich. Im speziellen Fall von Reststoff-Feuerungen schreiben gesetzliche Regelungen Grenzwerte für die Stickoxid-Emissionen ( $\text{NO}_x$ ) vor [1]. Zur  $\text{NO}_x$ -Reduktion kommt Ammoniak in Form einer wässrigen Harnstoff-Lösung (AdBlue™) zum Einsatz, dessen Dosierung bezüglich des Ammoniak-Gehaltes im Abgas mit Hilfe von Sensoren geregelt werden muss. Um auch kleine Feuerungsanlagen (0,1-0,5 MW) rentabel und effizient betreiben zu können, wurde dafür ein kapazitives Sensorelement zur Detektion von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) im Abgas entwickelt [2]. Außerdem kann eine kostengünstige Auswertelektronik mit der Verwendung weit verbreiteter MEMS-Komponenten ermöglicht werden.

## Methodik und Ergebnisse

Der entwickelte  $\text{NH}_3$ -Sensor basiert auf einem planaren keramischen Substrat, auf dem Funktionskomponenten in Siebdrucktechnik aufgebracht sind. Das Detektionsprinzip beruht auf den Adsorptionseigenschaften einer Zeolith-Funktionsschicht gegenüber Ammoniak [3]. Es treten sowohl Veränderungen der elektrischen als auch der dielektrischen Eigenschaften des Materials auf, die sich mit Hilfe der elektrochemischen Impedanzanalyse spezifizieren lassen [4].

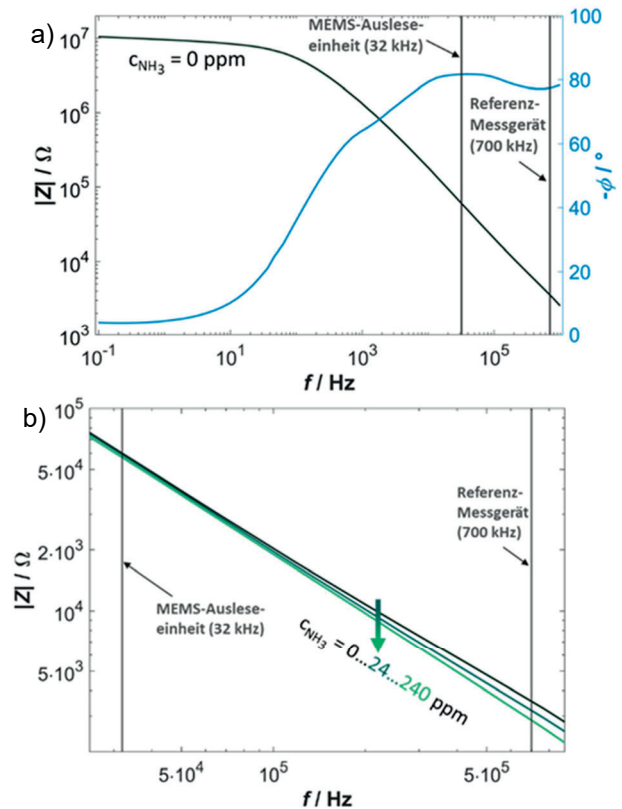
Die frequenzabhängige Charakterisierung des Sensors ohne  $\text{NH}_3$ -Dosierung ist in Abbildung 1a) bei einer Sensortemperatur von  $T_H = 400^\circ\text{C}$  dargestellt. Diese Messung fand mit einem Referenz-Messgerät zur elektrochemischen Impedanz-Analyse (Palm-Sens4) statt. Hierbei zeigte der  $\text{NH}_3$ -Sensor bei höheren Anregungsfrequenzen ( $f > 10\text{ kHz}$ ) ein nahezu kapazitives Verhalten ( $\varphi \approx -85^\circ$ ).

Für kontinuierliche Messungen wurde aufgrund des verringerten Signalrauschens infolge höherer Ströme eine Anregungsfrequenz von  $f = 700\text{ kHz}$  (sinusförmig) gewählt. Anhand der gemessenen betragsmäßigen Impedanz  $|Z|$  und des Phasenwinkels  $\varphi$  kann daraus die Kapazität  $C$  des Sensors anhand folgender Gleichung (1) berechnet werden.

$$C = \frac{\sin(-\varphi)}{2\pi f \cdot |Z|} \quad (1)$$

Als Vergleich hierzu wurde ein kommerziell erhältlicher digitaler Kapazitätskonverter (EVAL-CN0552-PMDZ) mit einer rechteckförmigen Anregung bei  $f = 32\text{ kHz}$  verwendet [5].

Capacitance-to-Digital-Converter (CDC) werden häufig für kapazitive MEMS-Module, wie z.B. Beschleunigungs- oder Drehratensensoren, eingesetzt und basieren auf dem Prinzip eines Delta-Sigma-Wandlers. Hierbei wird die Sensorkapazität über den Ladungsausgleich zu einem auf dem Modul verbauten Referenzkondensator bestimmt [6].

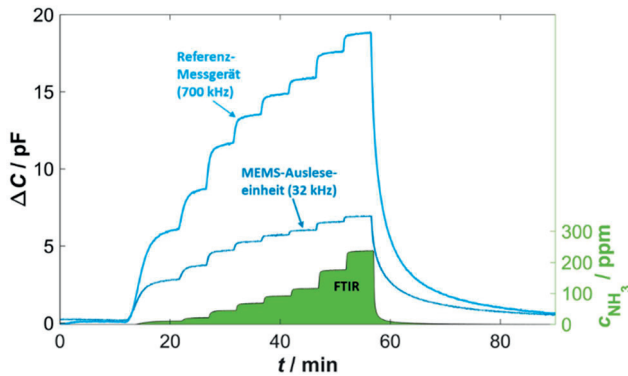


**Abb. 1:** Bode-Plot eines  $\text{NH}_3$ -Sensors, a) ohne  $\text{NH}_3$ -Dosierung im Frequenzbereich zwischen 0,1 Hz und 1 MHz, b) Dosierung unterschiedlicher  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen (0-240 ppm) im relevanten Bereich zwischen 32 und 700 kHz bei einer Sensortemperatur  $T_H = 400^\circ\text{C}$ , Grundgaszusammensetzung: 5 %  $\text{H}_2\text{O}$ , 3 %  $\text{CO}_2$ , 10 %  $\text{O}_2$  in  $\text{N}_2$

Neben dem frequenzabhängigen Verhalten des Sensors fallen zudem die Impedanzänderungen infolge variierender  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen (0-240 ppm) je nach gewählter Frequenz unterschiedlich stark aus.

Bei Auswertung der in Abbildung 1b) dargestellten betragsmäßigen Impedanz reduziert sich die Sensorantwort infolge der verringerten Anregungsfrequenz von 700 auf 32 kHz um ca. 60 %.

Diese Feststellung konnte durch die Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Kapazitätsänderung (bezogen auf den Grundwert bei 0 ppm NH<sub>3</sub>) in Abbildung 2 bestätigt werden.



**Abb. 2:** Bode-Plot eines NH<sub>3</sub>-Sensors bei Dosierung unterschiedlicher Ammoniak-Konzentrationen (0-240 ppm) bei einer Sensortemperatur  $T_H = 400$  °C, Grundgaszusammensetzung: 5 % H<sub>2</sub>O, 3 % CO<sub>2</sub>, 10 % O<sub>2</sub> in N<sub>2</sub>

Die Kapazitätsänderung der MEMS-Auswerteeinheit fiel infolge der geringeren Anregungsfrequenz im hier betrachteten Konzentrationsbereich von 0-240 ppm um den entsprechenden Faktor geringer aus. Allerdings ergibt sich durch die hohe Messauflösung des CDC's von ca. 50 fF eine ähnliche Signalstabilität im Vergleich zum Referenz-Messgerät. Dadurch kann je nach Konzentrationsbereich eine Auflösungsgrenze von bis zu 0,7 ppm NH<sub>3</sub> erreicht werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe einer auf dem Markt erhältlichen Auswerteeinheit zur Kapazitätsbestimmung konnte eine kostengünstige Lösung zur digitalen Datenerfassung eines Ammoniak-Sensors für Anwendungen in Biomasse-Feuerungen geschaffen werden.

Im nächsten Schritt erfolgt die Integration dieser Technologie in eine bereits vorhandene Temperaturregelung, um ein eigenständiges Messsystem für den Sensor bereitstellen zu können. Ein Fokus liegt hier auf der Schirmung der Sensor-Zuleitungen, um potenzielle kapazitive Einflüsse zu minimieren.

## Literatur

- [1] A. Ghosh, C. Zhang, S. Q. Shi, H. Zhang (2019): High-Temperature Gas Sensors for Harsh Environment Applications: A Review, *Clean – Soil, Air, Water* 47 (2019), doi: 10.1002/clen.201800491
- [2] T. Wöhrl, J. Kita, R. Moos, G. Hagen: Capacitive, Highly Selective Zeolite-Based Ammonia Sensor for Flue Gas Applications, *Chemosensors* 11 (2013), doi: 10.3390/chemosensors11070413
- [3] T.C. Brüggemann, F.J. Keil, Theoretical Investigation of the Mechanism of the Selective Catalytic Reduction of

Nitric Oxide with Ammonia on H-Form Zeolites, *The Journal of Physical Chemistry C* 112 (2008), doi: 10.1021/jp806674d

- [4] U. Simon, D. Sanders, J. Jockel, C. Heppel, T. Brinz: Design strategies for multielectrode arrays applicable for high-throughput impedance spectroscopy on novel gas sensor materials, *Journal of combinatorial chemistry* 4 (2002) 511–515, doi: 10.1021/cc020025p
- [5] Datenblatt CN-0552: Capacitance to Digital Converter with Extended Range, Analog Devices (2021), Website: <https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/cn-0552.pdf> (Letzter Zugriff am 02.08.2024)
- [6] J. Pérez Sanjurjo, E. Prefasi, C. Buffa, R. Gaggl: A Capacitance-To-Digital Converter for MEMS Sensors for Smart Applications, *Sensors* 17 (2017). doi: 10.3390/s17061312

## Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz und dem Projektträger Jülich für die Förderung des Projektes (FKZ: 03EI5435B) sowie dem DBFZ für die gute Zusammenarbeit.